

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-324634

(43)Date of publication of application : 22.11.2001

(51)Int.Cl.

G02B 6/13
G02B 5/18
G02B 6/122

(21)Application number : 2000-144280

(71)Applicant : NIPPON SHEET GLASS CO LTD

(22)Date of filing : 17.05.2000

(72)Inventor : YAMAGUCHI ATSUSHI

(54) METHOD FOR MANUFACTURING OPTICAL WAVEGUIDE HAVING GRATING**(57)Abstract:**

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a method for forming a grating in an optical waveguide which is three-dimensionally formed in the inside of glass by condensing a laser beam having high peak output in the inside of glass.

SOLUTION: In a method for manufacturing the optical waveguide wherein the laser beam having an energy quantity causing an optically induced change in refractive index is condensed in the inside of a glass material and the light condensing point is relatively moved along a prescribed path in the inside of the glass material to form a core in the inside of the glass material, a periodic refractive index modulation region is formed in the length direction of the core by periodically changing at least one of the intensity of the laser beam, a luminous flux diameter of the laser beam at the light condensing point and the speed of the relative movement.

LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

BEST AVAILABLE COPY

* NOTICES *

JPO and NCIP I are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. **** shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

CLAIMS

[Claim(s)]

[Claim 1] In the manufacture approach of the optical waveguide which condense laser light with the amount of energy which causes an optical induction refractive-index change inside a glass ingredient, and the condensing point is made displaced relatively in accordance with the predetermined path inside a glass ingredient, and forms a core in the interior of a glass ingredient The manufacture approach of the optical waveguide with a grating characterized by forming a periodic refractive index modulation field in the die length direction of said core when said laser luminous intensity , the flux of light diameter of the laser light in said condensing point , and the rate of said relative displacement change at least one periodically .

[Claim 2] Said periodic change is the manufacture approach of the optical waveguide with a grating according to claim 1 performed [average value / of the rate of said relative displacement / length / v and / of said grating / reflected wave] with the period of n_0 , then $\lambda_B/(2n_0v)$ in λ_B and the average refractive index of a core.

[Claim 3] It is the manufacture approach of optical waveguide with a grating according to claim 1 or 2 that said laser luminous intensity is changed periodically and said refractive-index modulation field is the periodic change part of the path of said core.

[Translation done.]

* NOTICES *

JPO and NCIP are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. **** shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

DETAILED DESCRIPTION

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention] This invention relates to the optical waveguide with a grating produced when said optical waveguide continues and formed a refractive-index change field in the interior of a glass ingredient by laser radiation especially about the optical waveguide in which the grating is formed.

[0002]

[The conventional approach] The optical waveguide which used glass as the base is formed by the ion-exchange method, flame hydrolysis, etc.

[0003] From slit-like openings, such as a metal membrane prepared in the glass substrate front face by the ion-exchange method, to Ag^+ Contact the fused salt containing Tl^+ , K^+ , or Li^+ ion to a glass substrate surface layer, and ion, such as above-mentioned Ag^+ , is made to exchange for Na^+ ion in a glass substrate. It is J.Lightwave Tech.Vol.16 for the concentration of ion, such as above-mentioned Ag^+ , to form a high refractive-index change field in a glass substrate surface layer, and to consider as optical waveguide. (4) It is indicated by 583 (1998). In order to make the refractive-index change field of this optical waveguide buried into glass and to use it as a core The glass substrate in which the above-mentioned refractive-index change field was formed is heated. Ag^+ of a glass substrate surface layer, It is immersed into the fused salt which is made to carry out spreading diffusion of Tl^+ , K^+ , or the Li^+ ion toward the interior of glass, or contains Na^+ ion again, and Ag^+ near a glass front-face side, Tl^+ , K^+ or Li^+ ion, and Na^+ ion are re-exchanged. There is also a method of impressing electric field in the case of this re-ion exchange. Na^+ ion moves the high refractive-index field on the front face of the maximum which Ag^+ , Tl^+ , K^+ , or Li^+ ion formed to the bottom of a front face. Consequently, a core is embedded in the bottom of a glass front face, and low propagation loss is secured. The core of the optical waveguide produced by this approach has many things with the hemicycle of 10-200 micrometers of diameters, or an almost circular cross section. By the ion-exchange method, since the ion exchange is adjusting refractive-index distribution, there is a problem that the formed optical waveguide structure is restricted to the part near a glass front face.

[0004] In flame hydrolysis, the object for bottom clads and the two-layer glass-particles layer for cores are made to deposit on the surface of a silicon substrate by flame hydrolysis of a silicon tetrachloride and a germanium tetrachloride, and a particle layer is reformed in a clear glass layer by heating at high temperature. Subsequently, it is J.Lightwave Tech.Vol.17 to form the core section which has a circuit pattern by the photolithography and reactant etching. (5) It is indicated by 771 (1999). The optical waveguide produced by this approach has thickness as thin as several micrometers. Moreover, the production approach of flame hydrolysis of optical waveguide is complicated, and it is restricted to the glass presentation to which the usable ingredient also considered the quartz as the principal component, and also has the problem that production of optical waveguide with a circular cross section is difficult, for the approach of reforming the particle deposited on the substrate front face in a glass layer.

[0005] In an ion-exchange method and flame hydrolysis, although the optical waveguide which has various two-dimensional patterns on the same substrate can be formed, it is still more

difficult to form the optical waveguide together put in three dimensions.

[0006] As an approach of making optical waveguide with a circular cross section forming in three dimensions into glass, there is the approach of forming optical waveguide by irradiating laser with a high peaking capacity value inside glass, for example as indicated by JP,9-311237,A and "light induction refractive-index change inside glass by ultrashort pulse laser" laser research 26(2) 150-154 (1998). By this approach, by condensing laser light with two or more 105 W/cm peak power reinforcement inside glass, and moving that condensing point relatively, the structural change which brings about refractive-index change is made to cause inside a glass ingredient, and optical waveguide is formed. By this approach, three-dimensions-optical waveguide is also easily producible by moving the condensing point of laser in three dimensions.

[0007] Making a grating form in an optical fiber and optical waveguide as a multiplexing/demultiplexing filter for wavelength multiplex transmission in recent years is performed. As the application, it is used, for example in the optical fiber as a component part of Optical Add/Drop Multiplexer which is expected when it comes to the key device in wave-length multiple telecommunication (J. Lightwave Tech.Vol.16 (2) 265 (1999)). Since the direct filter is formed on an optical fiber and optical waveguide, this grating has good affinity with a beam-of-light way, and since a huge number of grating layers are prepared in a longitudinal direction, it has the description which was [be / the design degree of freedom of spectral characteristics / large] excellent. From this, that a grating cannot be formed as optical waveguide means that the application of the optical waveguide is limited very much.

[0008] In order to make a grating form in the optical waveguide made by flame hydrolysis or the other approaches By the 2 flux-of-light interference exposing method in the core section as indicated by JP,10-339821,A for example, by or the phase grating mask method A refractive index makes the grating which changes periodically form in the core section by irradiating ultraviolet rays by cutting association of the dopant (GeO₂, P₂O₅, TiO₂ grade) doped by the core section, and producing a joint defect.

[0009]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] However, by irradiating laser with a high peaking capacity value inside glass, in the core section and the clad section, the optical waveguide of the presentation of glass produced by the approach of forming optical waveguide is the same, makes only a core part produce a joint defect alternatively, and cannot make a periodic refractive-index change.

[0010] This invention aims at offering the approach of making a grating forming in the optical waveguide formed in the interior of glass in three dimension, when peaking capacity condenses a high laser light inside glass.

[0011]

[Means for Solving the Problem] Using the path of the optical waveguide which will be formed if laser luminous intensity is changed changing, when this invention person changed laser luminous intensity periodically, he found out that a grating could be formed in optical waveguide.

[0012] This invention condenses laser light with the amount of energy which causes an optical induction refractive-index change inside a glass ingredient. In the manufacture approach of the optical waveguide which the condensing point is made displaced relatively in accordance with the predetermined path inside a glass ingredient, and forms a core in the interior of a glass ingredient When said laser luminous intensity, the flux of light diameter of the laser light in said condensing point, and the rate of said relative displacement change at least one periodically It is the manufacture approach of the optical waveguide with a grating characterized by forming a periodic refractive-index modulation field in the die-length direction of said core.

[0013] laser light with the amount of energy from which the optical waveguide with a grating of this invention starts an optical induction refractive-index change -- the interior of glass (a configuration -- plate-like --) The structural change which a globular shape, massive, etc. condense someday and brings about refractive-index change is made to cause inside a glass ingredient. It can manufacture easily by changing periodically the laser luminous intensity used for producing optical waveguide by moving the condensing point relatively, and producing optical waveguide in the location of the arbitration, and forming a grating.

[0014] As a laser light, although it changes also with classes of glass, in order to cause an optical induction refractive-index change, it is desirable to have two or more 105 W/cm peak power reinforcement in a condensing point. Peak power reinforcement is the value which expressed with per exposure unit area the peaking capacity (W) expressed with the ratio of "output energy [Per pulse] (J)"/"pulse width (second)". [1] Unless peak power reinforcement fulfills 105 W/cm², an optical induction refractive-index change does not take place, and optical waveguide is not formed. An optical induction refractive-index change is promoted, so that peak power reinforcement is high, and optical waveguide is formed easily. However, it is difficult to obtain the very big amount of energy, for example, two or more 105 W/cm continuous-wave-laser light, practical. Then, use of the pulse laser which made peaking capacity high is desirable by narrowing pulse width.

[0015] Laser light is condensed by beam condensing units, such as a lens. At this time, a condensing point is adjusted so that it may be located in the interior of a glass ingredient. By making this condensing point displaced relatively inside a glass ingredient, the long and slender refractive-index change field (core region of a high refractive index) committed as optical waveguide is formed in the interior of a glass ingredient. A condensing point is made displaced relatively by moving a glass ingredient continuously to the condensing point of laser light, or specifically moving the condensing point of laser light continuously inside a glass ingredient.

[0016] A grating is produced by changing laser luminous intensity periodically. If laser luminous intensity is changed, the high refractive-index core diameter of the optical waveguide formed will change so that it may increase or decrease according to the size of the reinforcement.

Therefore, carrying out relative displacement, by changing laser luminous intensity periodically in the location of the predetermined range, change of the refractive-index modulation field of optical waveguide, i.e., a diameter, periodically formed in the die-length direction of said core is formed, and a grating can be formed [above-mentioned] in optical waveguide by controlling it.

[0017] An optical waveguide grating is explained as follows. The Z-axis is taken in the die-length direction of optical waveguide, the grating section is made into $0 \leq z \leq L$, and refractive-index [of a core] $n(z)$ is the following type (1) and [Equation 1] in this part. $n(z) = n_0 + \Delta n \cos(2\pi z/\lambda_B)$ (1)

Suppose that it is expressed. n_0 is [refractive-index variation and λ_B of the average refractive index of the core of the grating section and Δn] grating periods here. Such a grating is the following type (2) and [Equation 2]. $\lambda_B = 2n_0\lambda$ (2)

It becomes the filter which comes out and reflects alternatively the light of Bragg (Bragg) wavelength λ_B (wavelength in a vacuum) expressed, and its near.

[0018] The period T , [Equation 3] which are expressed with the following type (3) in laser luminous intensity in order to make it the period of a grating set to λ_B [$=\lambda_B/(2n_0)$], when the rate which produces optical waveguide, i.e., the passing speed of the point inside glass condensing [laser], is set to v $T = \lambda_B/v = \lambda_B/(2n_0v)$ (3)

It is necessary to make it come out and change.

[0019] As stated above, in order to enlarge peak power of laser light, use of a pulse laser is desirable. Although it becomes easy to enlarge peak power so that the repeat frequency of the pulse of laser is low, if not much late, only a number pulse will not be irradiated by Bragg diffraction grid 1 period, change of the diameter of optical waveguide becomes less smooth in this case, and a Bragg diffraction grid is not filled. If it thinks that at least 100 pulses must be irradiated by per Bragg diffraction grid 1 period, pulse-repetition-frequency H of laser must be beyond the numeric value expressed with a formula (4). As this repeat frequency H , it is usually 10kHz or more.

[Equation 4] $H = 100.v/\lambda_B$ (4)

[0020] Although the output of laser itself may be changed, since the oscillation of laser becomes unstable in that case, as for a periodic change of laser light reinforcement, it is desirable to carry out in the exterior of laser oscillation equipment. Changing laser light periodically externally can be attained by installing the equipment for changing reinforcement periodically in the middle of the path of laser light. What changes periodically the ND filter from which concentration differs as equipment for making it change periodically, the thing to which the path of a diaphragm is

periodically changed and a beam diameter is changed can be considered. Moreover, there are the following as other methods of changing reinforcement periodically in the exterior of laser oscillation equipment. First, optical system is constructed so that laser light may be joined or more by dividing into two in the middle of a path. The switch for intercepting the light of each path in the part divided or more into two is installed, respectively. A grating is produced by changing laser light reinforcement periodically by adjusting with a switch the combination of the laser light made to join.

[0021] The above is applicable also to the formation approach of the grating by the long period diffraction grating which used association to the clad mode of the travelling direction of light in addition to it, although the formation approach of the grating in a Bragg diffraction grid was described.

[0022] Although the case where formed a periodic refractive-index modulation field in the die-length direction of said core, and optical waveguide with a grating was manufactured by changing laser luminous intensity periodically was explained, even if it replaces with periodic change of laser luminous intensity and changes periodically the laser flux of light diameter in a condensing point, the above can form a periodic refractive-index modulation field in the die-length direction of a core, and can manufacture optical waveguide with a grating. The laser flux of light diameter in a condensing point can be performed by changing periodically the beam width of the laser light which carries out incidence to a condenser lens. Moreover, a periodic refractive-index modulation field can be formed in the die-length direction of said core also by changing periodically the rate which makes a condensing point similarly displaced relatively inside a glass ingredient.

[0023]

[Embodiment of the Invention] Although an example is raised to below and this invention is more concretely explained to it, this invention is not limited to the following examples, unless the main point is exceeded.

It had the glass presentation shown in the [example 1] table 1, and the pulse laser light 2 was condensed with the lens 3, and the sample 1 of 20mm long, 20mm wide, and a rectangular parallelepiped configuration with a thickness of 5mm was irradiated, as shown in drawing 1. Laser light with 150 femtoseconds of pulse width oscillated as a pulse laser light 2 from 20Ti:aluminum laser excited by the argon laser, the repeat frequency of 200kHz, a wavelength [of 800nm], and an average output of 600mW was used. NA condensed [the scale factor] the laser light which was made to penetrate the first ND filter and was adjusted to the reinforcement of 450mW by 0.3 with the objective lens which is 10 times, it irradiated so that a condensing point might be produced inside a sample 1, and optical waveguide was produced, turning a sample 1 to an another side edge from the end, and making it move in the direction of an arrow head 5 at the rate of 50 micrometer/s.

[0024]

[Table 1]

A mol % examples		1		Example 2				SiO ₂		70.6		37.5		B-2s										
O3	0	12.5	aluminum	2O3	14.0	25.0	P2O3	0.7	0	Na2O	1.6	25.0	Li(s)2O	9.3	0	MgO	1.0	0	TiO ₂	1.6	0	ZrO ₂	1.2	0

[0025] the die length of the core of the optical waveguide produced by the above-mentioned approach -- the grating was mostly produced over 7mm of a center section. Periodic change of laser luminous intensity was performed by adjusting the second ND filter which was made to adjoin said first ND filter and was prepared. It set up so that the permeability of light might change gently-sloping using the thing of rotating type discoid and the highest permeability might become an increase of 10% of the minimum permeability as this ND filter, and so that that change might be repeated by one rotation 5 times. By the condensing point of laser light moving relatively, and rotating this disc-like ND filter by 24 revolutions per second, while [optical waveguide] being in 7mm of a center mostly, laser luminous intensity was changed (periodic T= 0.00833 seconds of change), and it adjusted in locations other than said 7mm so that rotation of a disc-like ND filter might be stopped and laser light might pass the minimum permeability part.

[0026] The following approaches estimated this optical waveguide with a grating. It leads to the

end face of the optical waveguide which produced the light of LED which has main oscillation wavelength in 1.3 micrometers by the single mode optical fiber for 1.3 micrometer, and alignment is carried out so that the outgoing radiation light reinforcement from the optical waveguide other end may become max. This outgoing radiation light was led to the optical spectrum analyzer by the single mode optical fiber for 1.3 micrometer, and the transparency spectrum was measured. The transparency spectrum of the optical waveguide in which a grating was not made to form was measured by the same approach, and seeing the difference estimated the effectiveness of a grating. The transparency spectrum measured about the optical waveguide which formed the grating in drawing 2 is shown. As shown in this drawing, it turns out that about 23dB of permeability is low in the wavelength of 1298nm, and with a half-value width [centering on 1298nm / of about 1.5nm] alternative reflection has taken place after this. In addition, a rapid reduction of the permeability centering on 1298nm as shows the transparency spectrum of the optical waveguide in which a grating was not made to form to drawing 2 was not observed at all. [0027] It had the glass presentation shown in the [example 2] table 1, and the pulse laser light 2 was condensed with the lens 3, and the sample of a 20mmx20mmx5mm rectangular parallelepiped configuration was irradiated, as shown in drawing 1 . Laser light with 150 femtoseconds of pulse width oscillated from 20Ti:aluminum3 laser of argon laser excitation as a pulse laser light 2, the repeat frequency of 200kHz, a wavelength [of 800nm], and an average output of 600mW was used. After making an ND filter penetrate and adjusting so that laser reinforcement may be set to 470mW, the beam was divided into two paths so that it might become an intensity ratio 1:9 on the way, and as reinforcement was a weak path, the switch which can intercept laser light was installed. Optical system was constructed and the laser light which joined was condensed with the 10 time objective lens of NA0.3 so that two divided beams might join, it irradiated so that a condensing point might be produced inside a sample 1, and optical waveguide was produced, moving a sample 1 at the rate of 50 micrometer/s.

[0028] the optical waveguide produced by the above-mentioned approach -- the grating was mostly produced 7mm in the center section. Periodic change of laser luminous intensity was performed by controlling the switch into which it was put on the way. When carrying out a laser beam exposure for the optical waveguide core formation of those other than 7mm of center sections, turn off a switch and laser light is intercepted. A switch is turned on with 116 periods/second by the grating part of 7mm of center sections. Pulse laser light with weaker reinforcement penetrates the time amount of the abbreviation one half for 1/116 second, and the time amount of the abbreviation one half for the following 1/116 second adjusted laser reinforcement, and made the grating form so that it may be intercepted.

[0029] The following approaches estimated this optical waveguide with a grating. It leads to the end face of the optical waveguide which produced the light of LED which has main oscillation wavelength in 1.3 micrometers by the single mode optical fiber for 1.3 micrometer, and alignment is carried out so that the outgoing radiation light reinforcement from the optical waveguide other end may become max. This outgoing radiation light was led to the optical spectrum analyzer by the single mode optical fiber for 1.3 micrometer, and the transparency spectrum was measured. The transparency spectrum of the optical waveguide in which a grating was not made to form was measured by the same approach, and seeing the difference estimated the effectiveness of a grating. The transparency spectrum measured about the optical waveguide which formed the grating in drawing 3 is shown. As shown in this drawing, it turns out that about 20dB of permeability is low in the wavelength of 1302nm, and with a half-value width [centering on 1302nm / of about 1.1nm] alternative reflection has taken place after this. In addition, a rapid reduction of the permeability centering on 1302nm as shows the transparency spectrum of the optical waveguide in which a grating was not made to form to drawing 3 was not observed at all. [0030]

[Effect of the Invention] As explained above, in case according to this invention it makes laser light with the amount of energy which causes an optical induction refractive-index change condense in glass and the condensing point is moved relatively, the core and grating of optical waveguide can be produced to coincidence by changing laser luminous intensity and others periodically.

* NOTICES *

JPO and NCIP are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.

2.**** shows the word which can not be translated.

3.In the drawings, any words are not translated.

DESCRIPTION OF DRAWINGS

[Brief Description of the Drawings]

[Drawing 1] They are the global placement Fig. (a) showing how to produce the optical waveguide with a grating of this invention, and the perspective view (b) showing the optical waveguide with a grating produced inside glass.

[Drawing 2] The transparency spectrum of the optical waveguide with a grating produced according to the example 1.

[Drawing 3] The transparency spectrum of the optical waveguide with a grating produced according to the example 2.

[Description of Notations]

1 Glass Sample

2 Pulse Laser Light

3 Condenser Lens

4 Condensing Point

5 The Migration Direction of Glass Sample

6 Optical Waveguide

[Translation done.]

* NOTICES *

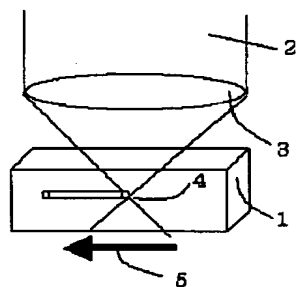
JPO and NCIP are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. **** shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

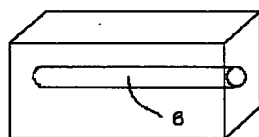
DRAWINGS

[Drawing 1]

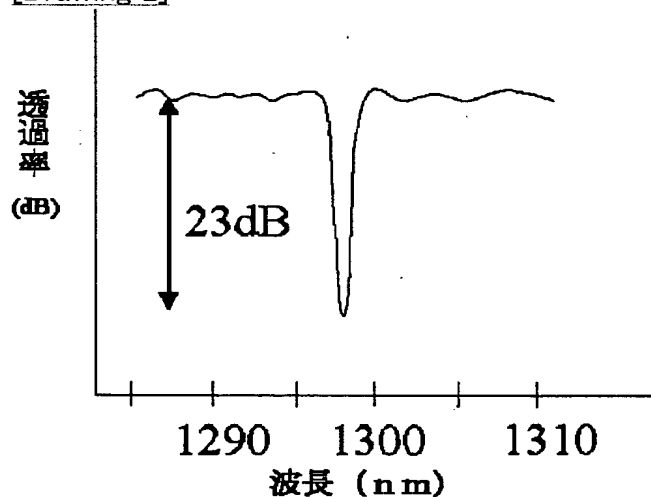
(a)



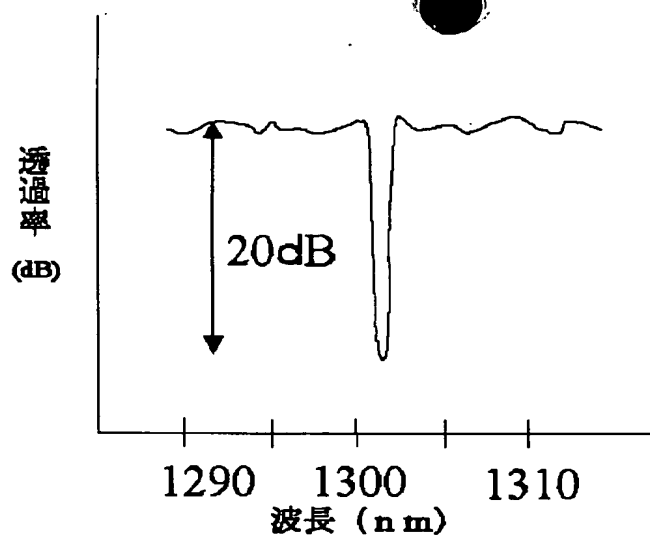
(b)



[Drawing 2]



[Drawing 3]



[Translation done.]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2001-324634

(P2001-324634A)

(43) 公開日 平成13年11月22日 (2001. 11. 22)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テームト* (参考)
G 0 2 B 6/13		G 0 2 B 5/18	2 H 0 4 7
5/18		6/12	M 2 H 0 4 9
6/122			A

審査請求 未請求 請求項の数 3 O L (全 6 頁)

(21) 出願番号	特願2000-144280 (P2000-144280)	(71) 出願人	000004008 日本板硝子株式会社 大阪府大阪市中央区北浜四丁目 7 番28号
(22) 出願日	平成12年 5 月17日 (2000. 5. 17)	(72) 発明者	山口 淳 大阪市中央区道修町 3 丁目 5 番11号 日本 板硝子株式会社内
		(74) 代理人	100069084 弁理士 大野 精市
		F ターム (参考)	2H047 KA03 KA11 PA11 PA22 QA04 2H049 AA06 AA33 AA45 AA59 AA62

(54) 【発明の名称】 グレーティング付き光導波路の製造方法

(57) 【要約】

【課題】 ピーク出力が高いレーザー光をガラス内部に集光することによってガラスの内部に3次元的に形成された光導波路にグレーティングを形成させる方法を提供する。

【解決手段】 光誘起屈折率変化を起こすエネルギー量をもつレーザー光をガラス材料の内部に集光し、その集光点をガラス材料の内部の所定経路に沿って相対移動させてガラス材料の内部にコアを形成する光導波路の製造方法において、前記レーザー光の強度、前記集光点におけるレーザー光の光束直径、および前記相対移動の速度の少なくとも一つを周期的に変化させることにより、前記コアの長さ方向に周期的な屈折率変調領域を形成する。

【特許請求の範囲】

【請求項1】 光誘起屈折率変化を起こすエネルギー量をもつレーザー光をガラス材料の内部に集光し、その集光点をガラス材料の内部の所定経路に沿って相対移動させてガラス材料の内部にコアを形成する光導波路の製造方法において、前記レーザー光の強度、前記集光点におけるレーザー光の光束直径、および前記相対移動の速度の少なくとも一つを周期的に変化させることにより、前記コアの長さ方向に周期的な屈折率変調領域を形成することを特徴とするグレーティング付き光導波路の製造方法。

【請求項2】 前記周期的変化は、前記相対移動の速度の平均値を v 、前記グレーティングの反射波長を λ_g 、コアの平均屈折率を n_0 とすれば、 $\lambda_g / (2 n_0 v)$ の周期で行われる請求項1記載のグレーティング付き光導波路の製造方法。

【請求項3】 前記レーザー光の強度を周期的に変化させ、前記屈折率変調領域は前記コアの径の周期的変化部分である請求項1または2に記載のグレーティング付き光導波路の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、グレーティングが形成されている光導波路に関し、特に、前記光導波路が、レーザー照射によってガラス材料の内部に屈折率変化領域を連続して形成することによって作製された、グレーティング付き光導波路に関する。

【0002】

【従来の方法】ガラスをベースとした光導波路は、イオン交換法、火炎加水分解法等で形成されている。

【0003】イオン交換法では、ガラス基板表面に設けた金属膜等のスリット状開口部から Ag^+ 、 Tl^+ 、 K^+ または Li^+ イオンを含む熔融塩をガラス基板表面層に接触させて上記 Ag^+ 等のイオンをガラス基板中の Na^+ イオンと交換させて、ガラス基板表面層に上記 Ag^+ 等のイオンの濃度が高い屈折率変化領域を形成し光導波路とすることが、たとえばJ.Lightwave Tech. Vol.16 (4) 583 (1998)に記載されている。この光導波路の屈折率変化領域をガラス中に埋没させてコアとするためには、上記の屈折率変化領域を形成したガラス基板を加熱して、ガラス基板表面層の Ag^+ 、 Tl^+ 、 K^+ または Li^+ イオンをガラス内部に向かって拡散移動させるか、または再度 Na^+ イオンを含む熔融塩中に浸漬してガラス表面側に近い Ag^+ 、 Tl^+ 、 K^+ または Li^+ イオンと Na^+ イオンを再交換する。この再イオン交換の際に電界を印加する方法もある。 Na^+ イオンは、 Ag^+ 、 Tl^+ 、 K^+ または Li^+ イオンが形成した最表面の高屈折率領域を表面下に移動させる。その結果、コアがガラス表面下に埋め込まれ、低伝播損失が確保される。この方法で作製した光導波路のコアは、径10～200 μm の半円形

またはほぼ円形の断面をもつものが多い。イオン交換法ではイオン交換によって屈折率分布を調整しているため、形成された光導波路構造がガラス表面に近い部分に限られるといった問題がある。

【0004】火炎加水分解法では、四塩化シリコンと四塩化ゲルマニウムの火炎加水分解によりシリコン基板の表面に下クラッド用及びコア用の2層のガラス微粒子層を堆積させ、高温加熱により微粒子層を透明ガラス層に改質する。次いで、フォトリソグラフィ及び反応性エッチングにより回路パターンをもつコア部を形成することが、例えばJ.Lightwave Tech. Vol.17 (5) 771 (1999)に記載されている。この方法で作製された光導波路は、膜厚が数 μm と薄い。また、火炎加水分解法は光導波路の作製方法が複雑であり、使用可能な材料も石英を主成分としたガラス組成に限られる、また基板表面に堆積した微粒子をガラス層に改質する方法のため、円形の断面を持つ光導波路の作製が困難であるという問題もある。

【0005】さらにイオン交換法、火炎加水分解法では、同一基板上に種々の二次元的パターンを持つ光導波路を形成できるものの、三次元的に組み合わされた光導波路を形成することは困難である。

【0006】円形の断面を持つ光導波路をガラス中に三次元的に形成させる方法としては、例えば、特開平9-311237号、および「超短パルスレーザーによるガラス内部の光誘起屈折率変化」、レーザー研究26(2)150～154 (1998)に開示されているように、ピーク出力値が高いレーザーをガラス内部に照射することによって光導波路を形成する方法がある。この方法では、10³W/cm²以上のピークパワー強度を持つレーザー光をガラス内部に集光し、その集光点を相対的に移動させることによって、屈折率変化をもたらす構造変化をガラス材料内部に起こさせ、光導波路を形成する。この方法ではレーザーの集光点を三次元的に移動させることによって三次元的な光導波路も容易に作製できる。

【0007】近年、波長多重伝送用合分波フィルターとして光ファイバー、光導波路にグレーティングを形成させることが行われている。その応用としては、例えば光ファイバーにおいては、波長多重通信でのキーデバイスとなると期待されているOptical Add/Drop Multiplexerの構成部品として利用されている(J.Lightwave Tech. Vol.16 (2) 265 (1999))。このグレーティングは光ファイバー、光導波路上に直接フィルターが形成されているため光線路との結合性がよく、長手方向に膨大な数のグレーティング層が設けられるためスペクトル特性の設計自由度が大きいなどの優れた特徴を有する。このことから、光導波路としてグレーティングが形成できないことは、その光導波路の用途が非常に限定されることを意味する。

【0008】火炎加水分解法またはその他の方法によって作られた光導波路にグレーティングを形成させるに

は、例えば特開平10-339821号公報に記載されているように、コア部に、2光束干渉露光法によりまたは位相格子マスク法により、紫外線を照射することによってコア部にドーピングされているドーパント (GeO_2 、 P_2O_5 、 TiO_2 等) の結合を切断して結合欠陥を生じさせることで、コア部に屈折率が周期的に変化するグレーティングを形成させる。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、ピーク出力値が高いレーザーをガラス内部に照射することによって光導波路を形成する方法によって作製した光導波路は、コア部とクラッド部においてガラスの組成は同じであり、コア部分のみに選択的に結合欠陥を生じさせて、周期的な屈折率変化を作ることはできない。

【0010】本発明は、ピーク出力が高いレーザー光をガラス内部に集光することによってガラスの内部に3次元的に形成された光導波路にグレーティングを形成させる方法を提供することを目的とする。

【0011】

【課題を解決するための手段】本発明者は、レーザー光の強度を変化させると形成される光導波路の径が変化することを利用して、周期的にレーザー光の強度を変化させると光導波路にグレーティングが形成できることを見出した。

【0012】本発明は、光誘起屈折率変化を起こすエネルギー量をもつレーザー光をガラス材料の内部に集光し、その集光点をガラス材料の内部の所定経路に沿って相対移動させてガラス材料の内部にコアを形成する光導波路の製造方法において、前記レーザー光の強度、前記集光点におけるレーザー光の光束直径、および前記相対移動の速度の少なくとも一つを周期的に変化させることにより、前記コアの長さ方向に周期的な屈折率変調領域を形成することを特徴とするグレーティング付き光導波路の製造方法である。

【0013】本発明のグレーティング付き光導波路は、光誘起屈折率変化を起こすエネルギー量をもつレーザー光をガラス内部（形状は平板状、球状、塊状等のいずれでもよい）に集光して屈折率変化をもたらす構造変化をガラス材料内部に起こさせ、その集光点を相対的に移動させることで光導波路を作製し、その任意の場所で光導波路を作製するのに用いられるレーザー光の強度を周期的に変化させてグレーティングを形成することで容易に製造できる。

【0014】レーザー光としては、ガラスの種類によっても異なるが、光誘起屈折率変化を起こすためには、集光点において 10^5 W/cm^2 以上のピークパワー強度を有することが望ましい。ピークパワー強度は、「1パルス当りの出力エネルギー (J)」/「パルス幅 (秒)」の比で表されるピーク出力 (W) を照射単位面積当たりで表した値である。ピークパワー強度が 10^5 W/cm^2 に

満たないと光誘起屈折率変化が起こらず、光導波路が形成されない。ピークパワー強度が高いほど光誘起屈折率変化が促進され、光導波路が容易に形成される。しかし、非常に大きなエネルギー量、例えば 10^5 W/cm^2 以上の連続発振レーザー光を実用的に得ることは困難である。そこで、パルス幅を狭くすることによりピーク出力を高くしたパルスレーザーの使用が好ましい。

【0015】レーザー光は、レンズ等の集光装置により集光される。このとき、ガラス材料の内部に位置するように集光点を調整する。この集光点をガラス材料の内部で相対移動させることにより、光導波路として働く、細長い屈折率変化領域（高屈折率のコア領域）がガラス材料の内部に形成される。具体的には、レーザー光の集光点に対しガラス材料を連続的に移動させ、あるいはガラス材料の内部でレーザー光の集光点を連続的に移動させることにより、集光点を相対移動させる。

【0016】グレーティングはレーザー光の強度を周期的に変化させることにより作製する。レーザー光の強度を変化させると、形成される光導波路の高屈折率コア径はその強度の大小に応じて増加または減少するように変化する。従って上記相対移動させながら、所定の範囲の位置でレーザー光の強度を周期的に変化させることにより、前記コアの長さ方向に周期的に形成される屈折率変調領域すなわち、光導波路径の変化が形成され、それを制御することによって光導波路にグレーティングが形成できる。

【0017】光導波路グレーティングは以下のように説明される。光導波路の長さ方向にz軸をとり、グレーティング部を $0 \leq z \leq L$ とし、この部分でコアの屈折率 $n(z)$ が下記式 (1)、

$$\text{【数1】 } n(z) = n_0 + \Delta n \cdot \cos(2\pi z / \Lambda) \quad (1)$$

と表されるとする。ここで n_0 はグレーティング部のコアの平均屈折率、 Δn は屈折率変化量、 Λ はグレーティング周期である。このようなグレーティングは下記式 (2)、

$$\text{【数2】 } \lambda_s = 2 n_0 \Lambda \quad (2)$$

で表されるBragg（ブラッグ）波長 λ_s （真空中の波長）およびその近傍の光を選択的に反射するフィルターとなる。

【0018】光導波路を作製する速度、すなわちガラス内部でのレーザー集光点の移動速度を v とした場合、グレーティングの周期が $\Lambda [= \lambda_s / (2 n_0)]$ となるようにするためには、レーザー光の強度を、下記式 (3) で表される周期 T 、

$$\text{【数3】 } T = \Lambda / v = \lambda_s / (2 n_0 v) \quad (3)$$

で変化させる必要がある。

【0019】上記に述べたように、レーザー光のピークパワーを大きくするためにはパルスレーザーの使用が望ましい。レーザーのパルスの繰り返し周波数が低いほどピークパワーを大きくすることが容易になるが、あまり

遅いとブラッグ回折格子1周期に数パルスしか照射されないことになり、この場合は光導波路の変化が滑らかではなくなりブラッグ回折格子を満たさない。ブラッグ回折格子1周期当りに最低100パルスは照射されなければならないと考えると、レーザーのパルス繰り返し周波数Hは式(4)で表される数値以上でなければならない。この繰り返し周波数Hとしては通常は10kHz以上である。

$$【数4】 H = 100 \cdot v / \Lambda \quad (4)$$

【0020】レーザー光強度の周期的な変化は、レーザーの出力自体を変化させてもよいが、その場合はレーザーの発振が不安定となるため、レーザー発振装置の外部で行うことが望ましい。外部でレーザー光を周期的に変化させることは、レーザー光の経路の途中に強度を周期的に変化させるための装置を設置することによって達成できる。周期的に変化させるための装置としては、濃度の異なるNDフィルターを周期的に切りかえるもの、絞りの径を周期的に変化させてビーム径を変化させるもの等が考えられる。また、レーザー発振装置の外部で強度を周期的に変化させる他の方法として以下のものがある。まずレーザー光を経路の途中で二つ以上にわけ、また合流するように光学系を組む。二つ以上にわけられた部分でそれぞれの経路の光を遮断するためのスイッチをそれぞれ設置する。合流させるレーザー光の組み合わせをスイッチで調節することによって周期的にレーザー光強度を変化させることによってグレーティングを作製する。

【0021】以上は、ブラッグ回折格子によるグレーティングの形成方法について述べたが、それ以外に、光の進行方向のクラッドモードへの結合を利用した長周期回折格子によるグレーティングの形成方法にも適用することができる。

【0022】以上は、レーザー光の強度を周期的に変化させることにより前記コアの長さ方向に周期的な屈折率変調領域を形成してグレーティング付き光導波路を製造する場合について説明したが、レーザー光の強度の周期的変化に代えて、集光点におけるレーザー光束直径を周期的に変化させても、コアの長さ方向に周期的な屈折率変調領域を形成してグレーティング付き光導波路を製造することができる。集光点におけるレーザー光束直径は、集光レンズに入射させるレーザー光のビーム幅を周期的に変化させることによっておこなうことができる。また同様にガラス材料の内部で集光点を相対移動させる速度を周期的に変化させることによっても前記コアの長さ方向に周期的な屈折率変調領域を形成することができる。

【0023】

【発明の実施の形態】以下に実施例をあげて本発明をより具体的に説明するが、本発明はその主旨を超えない限り、以下の実施例に限定されるものではない。

【実施例1】表1に示すガラス組成を有し、縦20mm、横20mm、厚み5mmの直方体形状の試料1に、図1に示すようにパルスレーザー光2をレンズ3で集光して照射した。パルスレーザー光2としては、アルゴンレーザーで励起したTi:Al₂O₃レーザーから発振されたパルス幅150フェムト秒、繰り返し周波数200kHz、波長800nm、平均出力600mWのレーザー光を使用した。第一のNDフィルターを透過させて強度450mWに調整したレーザー光を、NAが0.3で倍率が10倍の対物レンズで集光し、試料1の内部に集光点を生じるように照射し、試料1をその一端から他方端に向けて矢印5の方向に50μm/sの速度で移動させながら光導波路を作製した。

【0024】

【表1】

モル%	実施例1	実施例2
SiO ₂	70.6	37.5
B ₂ O ₃	0	12.5
Al ₂ O ₃	14.0	25.0
P ₂ O ₅	0.7	0
Na ₂ O	1.6	25.0
Li ₂ O	9.3	0
MgO	1.0	0
TiO ₂	1.6	0
ZrO ₂	1.2	0

【0025】上記方法で作製した光導波路のコアの長さのほぼ中央部の7mmにわたってグレーティングを作製した。レーザー光の強度の周期的な変化は、前記第一NDフィルターに隣接させて設けた第二のNDフィルターを調整することで行った。このNDフィルターとしては回転式円盤状のものをを用い、光の透過率がなだらかに変化し、最高透過率が最低透過率の10%増になるように、そしてその変化が1回転に5回繰り返されるように設定した。レーザー光の集光点が相対的に移動して光導波路のほぼ中央の7mmにある間は、この円盤状のNDフィルターを24回転/秒で回転させることによりレーザー光の強度を変化させ(変化の周期T=0.00833秒)、前記7mm以外の位置では円盤状のNDフィルターの回転を止めて最低透過率部分をレーザー光が通過するように調節した。

【0026】このグレーティング付き光導波路を以下の方法で評価した。1.3μmに中心発振波長を有するLEDの光を1.3μm用シングルモード光ファイバーによって作製した光導波路の端面まで導き、光導波路他端からの出射光強度が最大になるようにアライメントする。この出射光を1.3μm用シングルモード光ファイバーで光スペクトルアナライザーに導いて透過スペクトルを測定した。グレーティングを形成させなかった光導波路の透過

スペクトルを同様の方法で測定し、その差を見ることでグレーティングの効果を評価した。図2にグレーティングを形成した光導波路について測定した透過スペクトルを示す。この図に示すように、1298nmの波長において透過率が約23dB低くなっており、これから、1298nmを中心とした半値幅約1.5nmの選択的な反射が起こっていることがわかる。なお、グレーティングを形成させなかった光導波路の透過スペクトルは図2に示すような1298nmを中心とした透過率の急激な減少は全く観察されなかった。

【0027】〔実施例2〕表1に示すガラス組成を有し、2.0mm×2.0mm×5mmの直方体形状の試料に、図1に示すようにパルスレーザー光2をレンズ3で集光して照射した。パルスレーザー光2としては、アルゴンレーザー励起のTi:Al₂O₃レーザーから発振されたパルス幅150フェムト秒、繰り返し周波数200kHz、波長800nm、平均出力600mWのレーザー光を使用した。レーザー強度が470mWとなるようにNDフィルターを透過させて調整した後、ビームを途中で強度比1:9となるように2本の経路に分け、強度が弱い経路の途中でレーザー光が遮断できるスイッチを設置した。分けられた2本のビームが合流するように光学系を組み、合流したレーザー光をNA0.3の10倍対物レンズで集光し、試料1の内部に集光点を生じるように照射し、試料1を50μm/sの速度で移動させながら光導波路を作製した。

【0028】上記方法で作製した光導波路のほぼ中央部にグレーティングを7mm作製した。レーザー光の強度の周期的な変化は、途中に入れられたスイッチを制御することによって行った。中央部7mm以外の光導波路コア形成のためにレーザー光照射させるときはスイッチを切ってレーザー光を遮断しておき、中央部7mmのグレーティング部分で116回/秒の周期でスイッチを入れて、強度が弱い方のパルスレーザー光が116分の1秒の約半分の時間は透過し、次の116分の1秒の約半分の時間は遮断されるようにレーザー強度を調整してグレーティングを形成させた。

【0029】このグレーティング付き光導波路を以下の方法で評価した。1.3μmに中心発振波長を有するLEDの光を1.3μm用シングルモード光ファイバーによって作

製した光導波路の端面まで導き、光導波路他端からの射出光強度が最大になるようにアライメントする。この射出光を1.3μm用シングルモード光ファイバーで光スペクトルアナライザーに導いて透過スペクトルを測定した。グレーティングを形成させなかった光導波路の透過スペクトルを同様の方法で測定し、その差を見ることでグレーティングの効果を評価した。図3にグレーティングを形成した光導波路について測定した透過スペクトルを示す。この図に示すように、1302nmの波長において透過率が約20dB低くなっており、これから、1302nmを中心とした半値幅約1.1nmの選択的な反射が起こっていることがわかる。なお、グレーティングを形成させなかった光導波路の透過スペクトルは図3に示すような1302nmを中心とした透過率の急激な減少は全く観察されなかった。

【0030】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、光誘起屈折率変化を起こすエネルギー量を持つレーザー光をガラス中に集光させて、その集光点を相対的に移動させる際に、レーザー光の強度その他を周期的に変化させることによって、光導波路のコアとグレーティングを同時に作製することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明のグレーティング付き光導波路を作製する方法を示す概略配置図(a)、およびガラス内部に作製したグレーティング付き光導波路を示す斜視図(b)である。

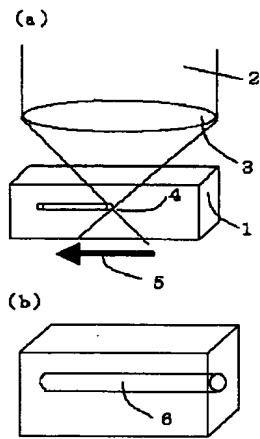
【図2】 実施例1によって作製したグレーティング付き光導波路の透過スペクトル。

30 【図3】 実施例2によって作製したグレーティング付き光導波路の透過スペクトル。

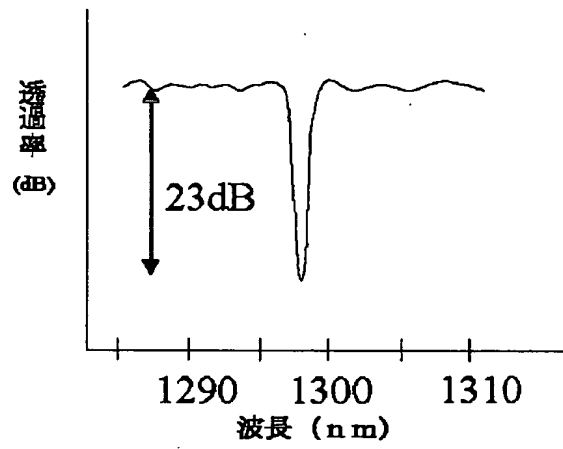
【符号の説明】

- 1 ガラス試料
- 2 パルスレーザー光
- 3 集光レンズ
- 4 集光点
- 5 ガラス試料の移動方向
- 6 光導波路

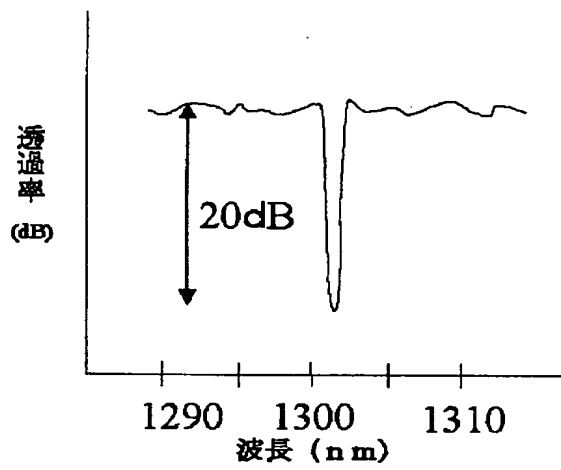
【図1】



【図2】



【図3】



28p-F-6

マルチモードファイバグレーティングの偏光特性と温度特性

Polarization and temperature properties of multimode fiber Bragg gratings

九州工業大学・工学部 水波 徹、T.V.Djambova

Faculty of Electrical Engineering, Kyusyu Institute of Technology

T.Mizunami and T.V.Djambova; e-mail:mizunami@elcs.kyutech.ac.jp

はじめに マルチモードファイバに形成したグレーティングは複数の反射波長を持ち、ファイバセンサ等に利用できるが、反射の機構はあまり知られていない。ここでは偏光測定を行いコア断面内の屈折率変化の対称性を論じた。また各反射波長の温度特性を求めた。

実験 図1のようにErドープファイバのASEを光源とし、反射光を半波長偏光コントローラと偏光子を通して測定した。偏光コントローラの回転に対するパワーの変化は $\pm 0.5\text{dB}$ 以下であり、偏光

は認められなかった。これからコア内の屈折率変化は軸対称であることが分かる。また17個所の反射波長のうち短波長側から7-9番目の温度依存性を図2に示した。その傾きは $1.3\text{pm}/^\circ\text{C}$ でシングルモードの場合とほぼ同じであった。

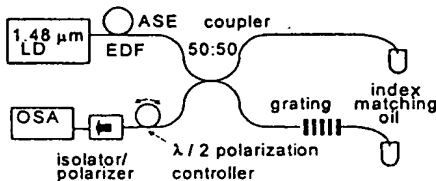


図1 偏光特性の実験装置

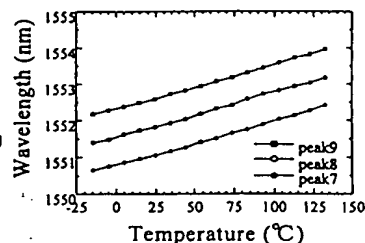


図2 温度特性の実験結果

28p-F-7

フェムト秒レーザによる長周期ファイバグレーティング

Long Period Fiber Grating by focused-irradiation of femtosecond laser pulses

JST 平尾プロ・昭和電線・サザンブトン大・京大院工・近藤裕己・野内健太郎・三露常男・渡辺秀・P.G.カザンスキー・平尾一之

Hirao Active Glass Project JST・Showa Electric Wire & Cable Co., Ltd.・Univ. of Southampton・Kyoto Univ.

Y.Kondo, K.Nouchi, T.Mitsuyu, M.Watanabe, P.G.Kazansky and K.Hirao

kentaro@hap.jst.go.jp

はじめに ファイバグレーティングは通常紫外線を照射することによりコアの屈折率を周期的に変化させ作製する。この際紫外線に対する屈折率変化の感度を高めるために高圧水素処理[1]やコア中のGeの高濃度化等が行われるが製造工程増加、屈折率差の調整が難しくなる等の問題がある。当プロジェクトではパルスレーザー光を集光照射することによりガラス構造が変化し、集光部分の屈折率が增加することを見出している[2][3]。この方法では前述したような前処理を施さずに部分的な屈折率変化を起こすことが可能である。今回光ファイバのコアにパルスレーザー光を集光照射し長周期ファイバグレーティングの作製を試みた。

実験 グレーティング書き込み用光源としてサザンブトン大・京大院工・近藤裕己・野内健太郎・三露常男・渡辺秀・P.G.カザンスキー・平尾一之の協力により、周波数200kHzを用いた。レーザー光を顕微鏡に入射し対物レンズによりSMファイバコアに集光した。光ファイバを数百μmの周期でずらしながらグレーティング長が30mmになるまでこの作業を行った。

結果 図1に周期460μmで集光照射した光ファイバの透過スペクトルを示す。1490nm付近に損失ピークが確認でき、損失は約12dBであった。光ファイバ部分に周期的にフェムト秒レーザーパルスを集光照射することにより、長周期ファイバグレーティングを作製することが出来た。このファイバの高温特性を調べた結果500℃8時間の連続高温加熱でも安定した透過特性が得られた。また室温まで冷却すると加熱前の特性を回復することから、加熱による屈折率変調構造の劣化はないと考えられる。

参考文献 [1]P.J.Lemaire et al., Electron.Lett.29, 1191 (1993)

[2]K.M.Davis et al., Opt.Lett.21, 1729(1996)

[3]K.Miura et al., Appl.Phys.Lett.71, 3329(1997)

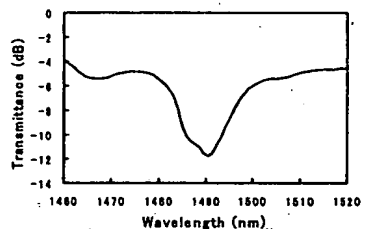


図1.長周期グレーティングの透過スペクトル

28p-F-8

カスケード長周期ファイバ回折格子のスペクトル特性

Optical Characteristics of Cascaded Long-period Fiber Gratings

大工研・三菱電線工業・西井準治・Byeong Ha Lee・中井忠彦・今村一雄

ONRI, Mitsubishi Cable Ind.・J.Nishii, B.H.Lee, T.Nakai and K.Imamura

jnishii@onri.go.jp, leebh@onri.go.jp, imamurak@mitsubishi-cable.co.jp

はじめに 光ファイバに長周期回折格子(LPG)を2カ所書き込むと、干渉によるピークの分裂が起こり、マルチチャネルフィルタ等に応用できる。ここでは干渉縞のピッチを決める要因を実験と理論の両面で検討した。

実験・結果 DSC(Dual Shape Core)型DSFファイバにマスク(500μmピッチ)を介してKrFレーザー光を照射し、20mm長のLPGを種々の間隔で2カ所書いた。2つのLPGを間隔(L: LPGの中心間距離)300mmで書いた場合の第3次ピークのスペクトルを図1に示す。干渉縞ピッチ $\Delta\lambda_{\text{spec}}$ の逆数は、Lに対して直線的に増加した(図2)。

2つのLPG通過後のコアおよびクラッドを伝播する波長 λ の光の位相差 Ψ は、 $\Psi = (\beta_{\text{core}} - \beta_{\text{clad}}) \cdot L = 2\pi L \cdot \Delta n / \lambda$ で表される。 β は伝搬定数、 Δn はコアとクラッドの等価屈折率差である。この式の一次微分は $d\Psi = |2\pi L \cdot \Delta n / \lambda^2| d\lambda$ となる(ここで $\Delta n = \Delta n - \lambda \Delta n'$)。干渉条件($d\Psi = 2\pi$)では、 $d\lambda = \lambda^2 / (L \cdot \Delta n)$ となり、干渉縞のピッチは $d\lambda$ と等価なので、図2に示すような直線関係になると説明される。

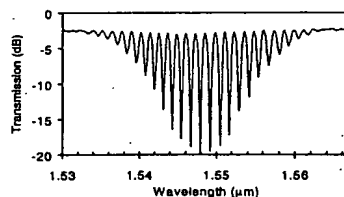


図1.カスケードLPGのスペクトル(L=300mm)

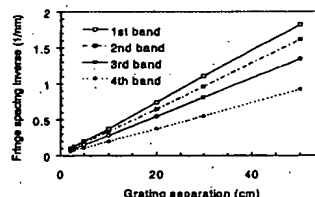


図2.干渉縞ピッチのLPG間隔依存性

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.